

Rilievo micrometrico di superfici con metodi ottici

Michele Lanzetta, Giovanni Tantussi, Valerio Zambardi

Viene presentato un sistema di misura per digitalizzare, con precisione micrometrica, le superfici di gran parte dei materiali utilizzati nell'ambito dell'ingegneria meccanica. Il sistema comprende un profilometro ottico integrato ad un rugosimetro a stilo, con i vantaggi di rapidità, accessibilità e precisione di entrambe le tecniche di scansione, con e senza contatto. Vengono descritti i principali moduli, inclusa la parte di movimentazione automatizzata del provino e un apposito software di controllo e di analisi dei profili acquisiti. L'articolo discute anche le problematiche legate alla strategia di scansione e preelaborazione dei dati.

Keyword

metrologia, analisi di superfici, profilometria ottica

Gli strumenti di misura di tipo ottico presentano una notevole diffusione in molte applicazioni metrologiche. Un campo applicativo di particolare interesse in ambito industriale riguarda l'identificazione, con precisione micrometrica, delle caratteristiche geometriche relative alle superfici dei prodotti sottoposti a lavorazioni meccaniche [1, 2, 3, 4]. Il sistema di misura descritto in questo articolo è composto da quattro moduli controllati da PC e consente di ricostruire superfici piane o cilindriche (tabella 1), mettendone in evidenza le relative caratteristiche geometriche di dettaglio.

DISPOSITIVI DI MISURA E ACQUISIZIONE DATI	
Componente (Costruttore – modello)	Caratteristiche principali
Profilometro ottico Omron ZS-LD20T	- Sensore di immagini 2D CMOS - Distanza di misura: 20 ± 1 mm - frequenza aggiornamento segnale: 110 μ s - Risoluzione: 0,25 μ m - Laser rosso, dimensione spot: $\varnothing 25$ μ m - Campo del segnale d'uscita: ± 10 V
Scheda di acquisizione analogica/digitale Labjack U12	- Connessione USB al PC - Risoluzione: 12-bit - Campo del segnale di ingresso: ± 10 V
Scheda di controllo movimento Gallil DMC2143 (un asse rotante provvede il sistema di posizionamento di precisione per l'acquisizione di superfici cilindriche)	- Connessione al PC tramite porta seriale (RS232 a 19.200 bps) - Configurabile da utente per motori a passo. - Uscite per i motori a passo: fino a 3 MHz - Campo di variazione della posizione: 32 bit - Risoluzione teorica: 0,028°
Modulo di traslazione provino Pollux VT80 (due moduli) Motori a passo: 1,2 A, 1,8°	- Connessione al PC tramite porta seriale (RS232 a 19.200 bps) - Campo di escursione: 100 mm - Viti senza fine a ricircolazione di sfere - Interruttori di fine corsa integrati - Massima velocità: 14 mm/s - Massimo carico: 1 kg - Ripetibilità: ± 1 μ m, ± 15 μ m (bi-direzionale)

Tabella 1 - Caratteristiche principali dei dispositivi di misura e di movimentazione utilizzati per lo sviluppo del sistema di acquisizione delle superfici

M. Lanzetta, Università di Pisa DIMNP Sezione Produzione e Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Istituto di Scienze e Tecnologie dell'Informazione (ISTI) "A. Faedo", Pisa, Italia; G. Tantussi, V. Zambardi - Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione (DIMNP), Sezione Produzione, Pisa, Italia

I componenti del sistema e le relative specifiche, desunte dai manuali d'uso [5, 6, 7, 8], sono descritti nella tabella 1.

Descrizione generale

Il sensore, che è montato su un asse mobile verticale, esegue la scansione misurando la distanza dei punti della superficie del provino rispetto ad un riferimento posto ad una distanza di 20 mm dalla sorgente luminosa (figura 2). I dati vengono trasferiti al computer attraverso una scheda di acquisizione. Il moto di scansione, che è posseduto dal provino (esiste anche una configurazione con sensore mobile), è realizzato, nel caso di scansione piana, da una coppia di assi motorizzati e, nel caso di scansione di una superficie cilindrica, attraverso un secondo controllore che porta in rotazione un asse aggiuntivo su cui viene montato il provino.

Il sistema è gestito tramite un'interfaccia grafica, sviluppata in ambiente Visual Basic, che comprende varie funzioni, tra cui:

- scansioni singole o multiple;
- visualizzazione dei profili acquisiti;
- determinazione dei principali parametri caratteristici di un singolo profilo, quali linea media, parametri di rugosità, di ondulazione ecc.
- salvataggio delle superfici (intere, porzioni o

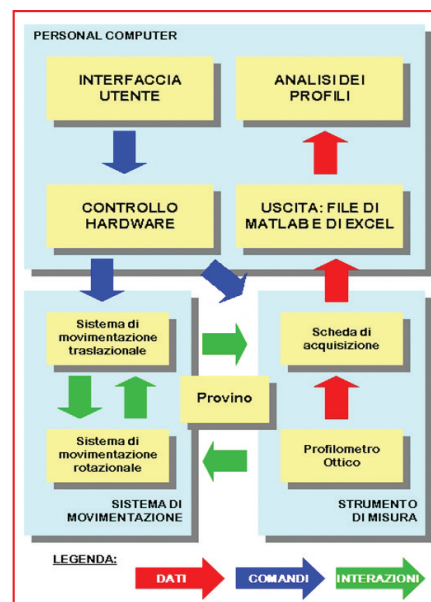


Figura 1 - Schema a blocchi del sistema

TECNICA Strumentazione

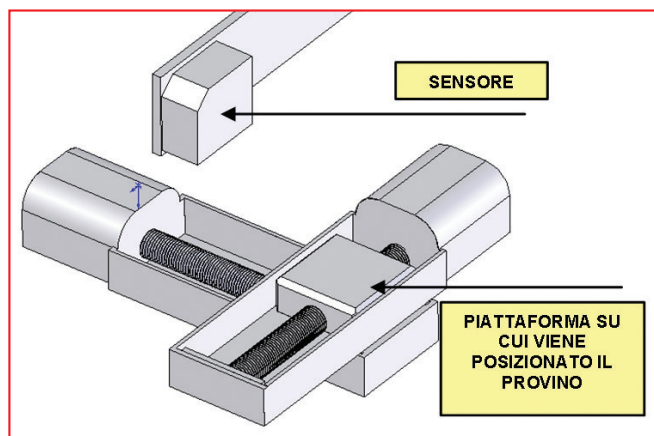


Figura 2 - Ricostruzione CAD del modulo di acquisizione ottica e movimentazione piana del sistema realizzato

singoli profili) per ulteriori analisi con programmi esterni. Nella figura 1 è rappresentato uno schema logico del sistema integrato proposto.

Software

Nella figura 3 è rappresentata l'interfaccia con cui è possibile programmare le acquisizioni e salvare i dati. La parte sinistra

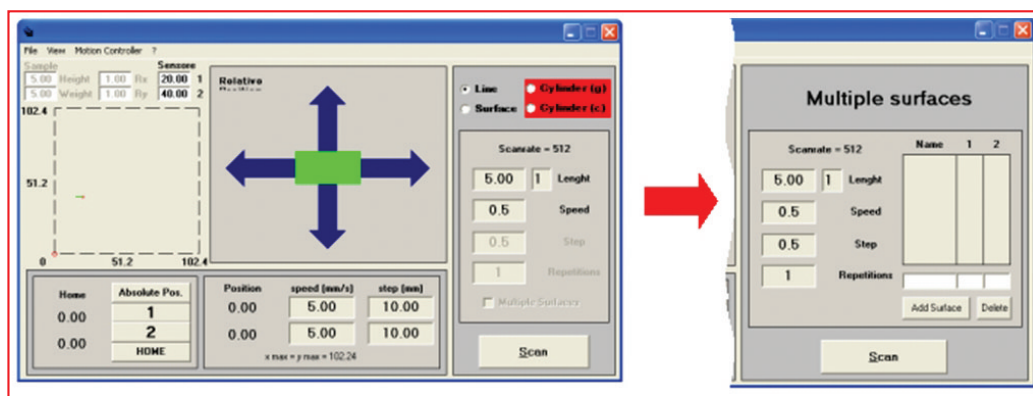


Figura 3 - Interfaccia per il controllo del sistema e per programmare le acquisizioni

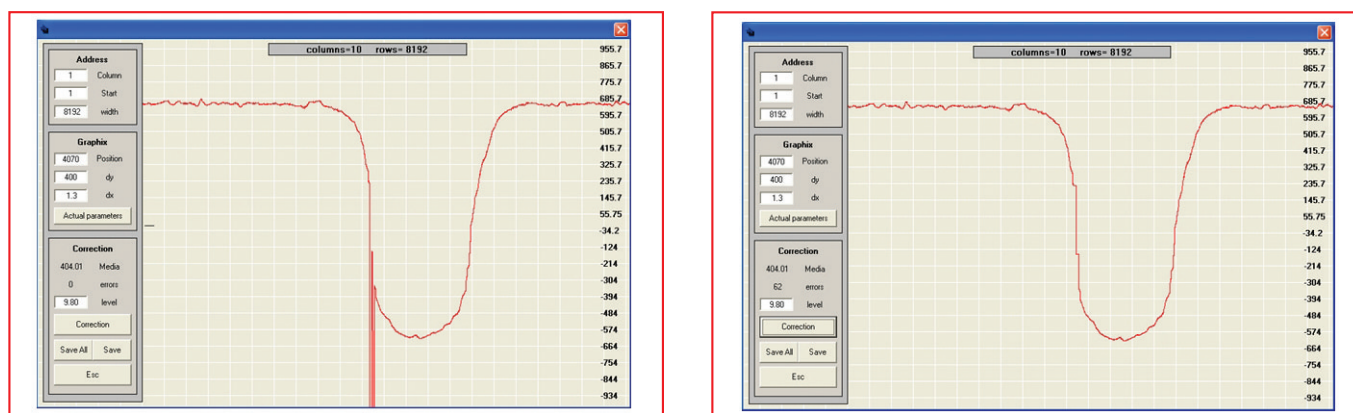


Figura 4 - Profilo trasversale di un solco realizzato tramite incisione laser su un provino di marmo, come acquisito (sinistra) e dopo correzione automatica (destra)

della schermata, in cui vengono visualizzate la posizione XY dei due assi motorizzati, del sensore e di un box che circonda il provino, è destinata al posizionamento iniziale prima della misura, che può avvenire tramite frecce o facendo click sul punto da raggiungere.

Nella parte destra della schermata è invece possibile programmare le acquisizioni. Come mostrato nella figura, è possibile selezionare le opzioni "linee", "superfici piane" e "superfici cilindriche" (queste ultime possono essere ricostruite partendo dalle generatrici o dalle circonferenze). In seguito vengono attivate le caselle necessarie ad impostare i parametri caratteristici del particolare tipo di scansione scelto: cioè la frequenza/spaziatura di scansione nelle due dimensioni della superficie. Ad esempio, nel caso di scansione piana, è possibile variare la lunghezza delle singole linee di scansione, il numero di linee contigue acquisite, il passo tra i profili e la frequenza di campionamento dei singoli punti. I file generati dal programma sono costituiti da matrici di numeri rappresentativi delle quote rilevate, in vari formati (per esempio xls), che possono essere successivamente rielaborati e analizzati con appositi programmi che sono stati sviluppati in Excel e Matlab.

Al termine della scansione viene aperta una nuova schermata in cui viene visualizzato il grafico con il profilo relativo alle singole colonne della matrice di dati appena salvata. In questa finestra è anche possibile eseguire il filtraggio del profilo, o di una parte di esso, per eliminare eventuali errori di misura (spike) dovuti allo scattering del laser del sensore sulla superficie del provino. Nella figura 4 è visibile un singolo profilo della superficie rappresentata nella figura 6 e la relativa correzione.

Nella figura 5 è invece raffigurata la ricostruzione della superficie di un provino di marmo che è stato sottoposto ad una lavorazione con getto d'acqua ad alta pressione (waterjet).

Dall'immagine è possibile

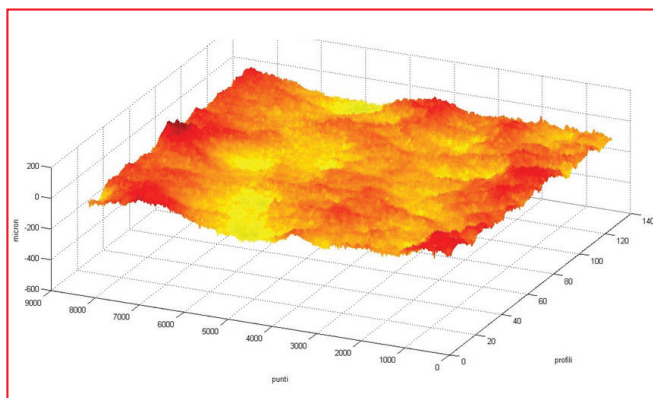


Figura 5 - Superficie digitalizzata di un provino di marmo trattato con lavorazione waterjet

riconoscere l'andamento principale delle passate (nella direzione dei singoli profili).

Correzione dei profili acquisiti

Le elevate discontinuità su un profilo derivano dallo scattering del laser del sensore ottico sulla superficie del provino da misurare e sono valori errati della lettura (figura 4).

La correzione è necessaria in due casi:

- in presenza di un segnale di tensione corrispondente ad una quota di 999 μm rispetto al riferimento;
- in presenza di un segnale di tensione isolato, palesemente scorretto (ad es. una quota di +300 μm in un tratto in cui il profilo è costante a -600 μm).

La correzione può essere eseguita in due modi diversi:

- sostituendo ai valori delle letture al di sopra di una soglia pre-scelta il primo valore buono che il computer individua ripercorrendo a ritroso la matrice di dati che si sta esaminando;
- eliminando il valore errato.

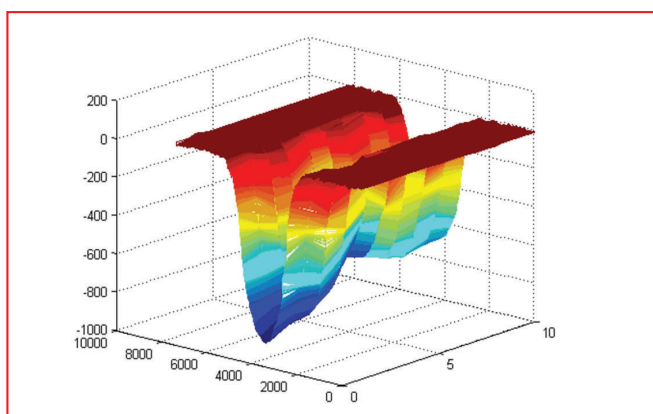


Figura 6 - Ricostruzione della superficie di un provino sottoposto a incisione waterjet

Per il secondo tipo di errori il software dispone di una funzione che consente di "spezzare" ogni singolo profilo in due o più profili diversi in modo da eseguire la correzione su ognuno di essi variando il valore di soglia (figura 7). I profili corretti

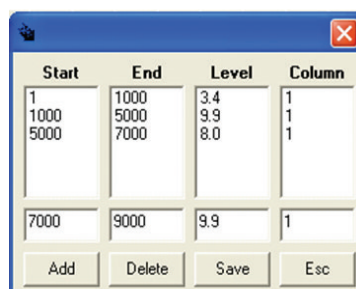


Figura 7 - Interfaccia del programma per la correzione dei profili

vengono poi ricompattati fino a ricostruire la linea intera dopo aver eliminato tutti gli errori.

Il software fornisce anche il numero di correzioni effettuate; in questo modo è possibile decidere di ripetere l'acquisizione, variando i parametri di misura, nel caso in cui il numero di errori sia eccessivo.

Validazione del sistema

Le prestazioni del sensore laser possono essere influenzate dalle proprietà ottiche dei materiali. A tal proposito, per validare il sistema sono state prese in esame due tipologie di materiali: metalli (totalmente riflettenti) e marmi (che assorbono parte della radiazione incidente).

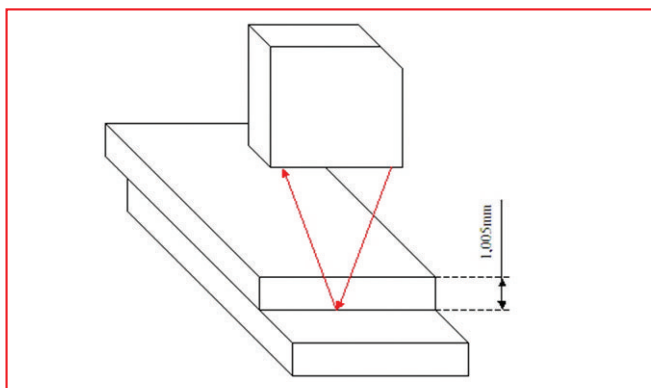


Figura 8 - Schema della misura per la validazione dello strumento con i metalli

Nel caso dei metalli, la validazione è stata effettuata misurando lo spessore di campioni di dimensioni note e, in particolare dei blocchetti pianparalleli (o di Johansson), strumento metrologico comunemente usato in officina. Un blocchetto posizionato su un altro blocchetto

(entrambi di misura nota al micron di precisione) vi aderisce creando una quota di riferimento (figura 8).

È stata acquisita la superficie risultante a cavallo del gradino prodotto dai due blocchi sovrapposti, utilizzando i parametri dello

Velocità	0,8 mm/s
Lunghezza	1 mm
Ripetizioni	10
Passo	0,25 mm
Freq. scansione	512 scansioni/s
Emissione luminosa*	Auto
Modo di misura*	STAND
Oggetto della misura*	Mirror

Tabella 2 - Parametri utilizzati nella misura dello spessore dei blocchetti Johansson.

L'asterisco (*) contrassegna le voci riferite alle impostazioni del sensore. In base a [6], la precisione aumenterebbe con i modi di misura "HIRESO" e "HISENS", a scapito dei tempi di scansione (che aumenterebbero a 2 e 4 ms)

strumento riportati nella tabella 2. Un esempio di misurazione di un blocchetto dello spessore di 1,005 mm è riportato nella tabella 3.

	Media 100 valori PRIMA del gradino	Media 100 valori DOPO il gradino	Spessore
profilo 1	618,7	384,3	1003
profilo 2	617,7	384,8	1002,5
profilo 3	618,2	384,5	1002,7
profilo 4	618,5	383,6	1002,1
profilo 5	618,0	383,0	1001
media	618,22	384,04	1002,26

Tabella 3 - Risultati della misura dello spessore del campione per differenza tra le quote precedenti e successive allo scalino nella figura 8. Valore nominale = 1,005 mm

Facendo la media dei 50 valori di ogni profilo relativi al tratto a cavallo dello scalino nella figura 8 è stato ottenuto un errore inferiore a 3 μm .

N° profili	20
Spaziatura tra i profili (mm)	0,5
Lunghezza dei profili (mm)	12,5
Lunghezza d'onda di taglio λ_c (mm)	2,5
Frequenza di scansione (campioni/s)	512
Velocità di traslazione (mm/s)	0,8
risoluzione lineare (campioni/mm)	640
Emissione luminosa*	Auto
Modo di misura*	Stand
Oggetto della misura*	Normal

Tabella 4 - Parametri relativi alla misura della rugosità di provini di marmo con profilometro ottico. Sono contrassegnate con l'asterisco (*) le voci riferite alle impostazioni del sensore

Ripetibilità del sistema

L'analisi di ripetibilità consiste nell'acquisire più volte uno stesso profilo mantenendo i parametri di acquisizione costanti. Nella tabella 6 sono riportati i parametri utilizzati nella misura effettuata.

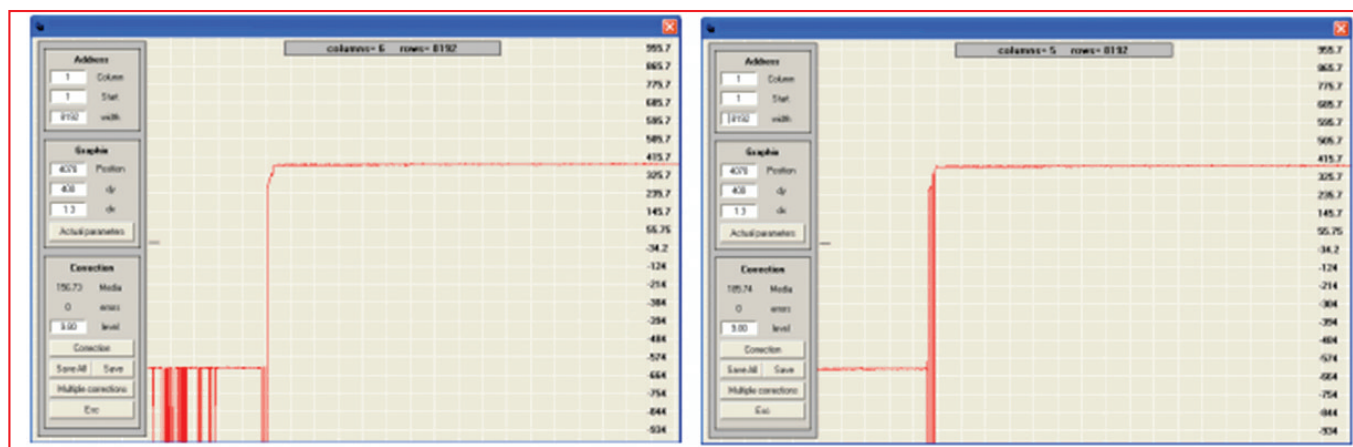


Figura 9 - Profilo dello scalino prodotto sovrapponendo due blocchi Johansson (sinistra = modo "Normal"; destra = modo "Mirror")

Nella figura 9 è riportato il profilo prodotto dalla sovrapposizione dei blocchi Johansson acquisito con il modo "Normal" e con il modo "Mirror", che possono essere selezionati sull'unità di controllo del sensore [5]. Come prevedibile, nel secondo caso si sono verificati meno errori, trattandosi di superficie ad elevata finitura totalmente riflettente. Il sensore dispone anche di altre impostazioni con cui è possibile regolare l'emissione luminosa e l'entità della frequenza di campionamento. Ad esempio, il modo di misura "Stand" prevede un ciclo di misura di 500 μs [5].

Un ulteriore riscontro sulla precisione del sistema si è avuto misurando i valori di rugosità relativi a provini di marmo sottoposti a lavorazione waterjet e confrontando i risultati ottenuti dal profilometro con quelli di uno strumento a contatto (rugosimetro). In questo caso il confronto è tra valori medi per l'impossibilità di acquisire i medesimi punti. A titolo di esempio, si riportano nella tabella 5 i risultati delle acquisizioni di due campioni ottenuti con i parametri della tabella 4.

Provino 1				Provino 2			
Profilometro		Rugosimetro		Profilometro		Rugosimetro	
Ra68	Wt68	Ra68	Wt68	Ra6	Wt6	Ra6	Wt6
Media = 7,84	Media = 187,9	Media = 6,963	Media = 145,9	Media = 19,12	Media = 186,2	Media = 20,66	Media = 187,1
$\sigma = 1,236$	$\sigma = 70,6538$	$\sigma = 1,14$	$\sigma = 77,33$	$\sigma = 3,825979$	$\sigma = 38,443$	$\sigma = 3,8128$	$\sigma = 41,93$

Tabella 5 - Risultati di 20 misure di rugosità eseguite rispettivamente con profilometro ottico e rugosimetro su campioni di marmo identificati con i numeri 68 e 6. Sono stati calcolati rispettivamente i valori standard di ondulazione Wt e di rugosità Ra

Velocità di scansione	0,125 mm/s
Lunghezza linea	1 mm
Frequenza di scansione	512 scansioni/s
Velocità corsa ritorno	0,1 mm/s
Ripetizioni	2 x 5
Emissione luminosa*	Auto
Modo di misura*	Stand
Oggetto della misura*	Normal

Tabella 6 - Parametri relativi alla prova di ripetibilità. Con l'asterisco (*) sono contrassegnate le voci riferite alle impostazioni del sensore

Da questa prova, che è stata eseguita acquisendo 2 gruppi di 5 linee coincidenti (ossia 2 superfici convenzionali costituite da 5 linee seguite sullo stesso profilo, eliminando il moto di alimentazione ortogonale alla traiettoria dei singoli profili), è

stata ottenuta una matrice di 10 colonne e 4096 righe da cui è stato possibile dedurre le due informazioni seguenti:

- la traslazione longitudinale relativa dei profili (errore di posizionamento);
- la differenza assoluta tra i profili: somma dei valori assoluti delle differenze tra le coppie di numeri relativi a colonne adiacenti della matrice generata (errore assoluto).

	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	media
Errore di posizionamento	1,5	0,25	0,5	0,25	2,5	0,25	0,25	0	0,25	0,63
Errore assoluto	2138	2478	2006	2092	3737	2303	2409	2060	1994	2357
Errore medio	0,52	0,60	0,48	0,51	0,91	0,56	0,58	0,50	0,48	0,57

Tabella 7 - Risultati della misura di ripetibilità espressa in μm

Come si vede nella tabella 7, la ripetibilità del sistema è superiore al micron e la precisione assoluta del posizionamento è di poco inferiore a $0,5 \mu\text{m}$.

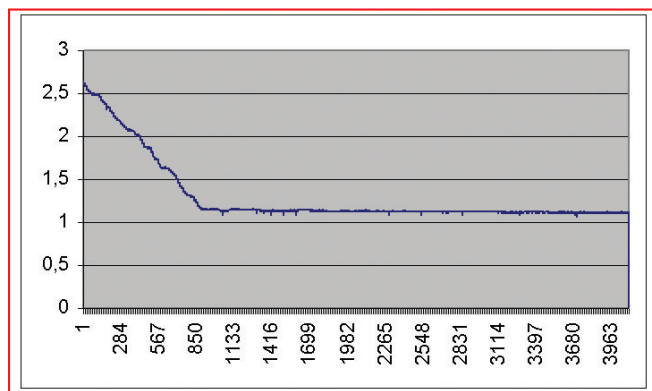


Figura 10 - Acquisizione di un profilo inclinato con ritardo relativo tra guide motorizzate e scheda d'acquisizione. A partire dal campione 850 le guide si sono arrestate mentre continua l'acquisizione

Se però si trascura la prima linea di ogni ciclo di 5 scansioni (linea 1 e linea 6), la precisione del posizionamento sale a $0,25 \mu\text{m}$.

Per comprendere più a fondo questo aspetto si consideri la figura 10, in cui è rappresentato un profilo inclinato acquisito volutamente mentre il computer eseguiva altri programmi di grafica. Il tratto orizzontale nel grafico è dovuto al ritardo

della scheda d'acquisizione rispetto alle guide motorizzate che hanno terminato la corsa prima della fine dell'acquisizione determinando l'acquisizione della stessa quota. Per risolvere questo problema il software di gestione del sistema è stato modificato in modo da eseguire, prima di ogni misura, un'acquisizione fittizia della lunghezza di 1 mm, per raggiungere una situazione di regime.

Gli errori derivanti dall'accelerazione delle guide motorizzate sono stati invece eliminati trascurando i valori corrispondenti al tratto iniziale di ogni linea, tenendo presente che l'accelerazione è pari a 200 m/s^2 . Ad esempio, con una frequenza di acquisizione di 512 scansioni/s e una velocità relativa tra il sensore e il provino di 1 mm/s , vengono eliminati i 3 valori estremi di ogni profilo.

Esempi di applicazioni

Il sistema ha permesso di valutare il risultato di alcuni processi di lavorazione innovativi per materiali lapidei. Questo tipo di analisi non può essere effettuata con strumenti a contatto (tipo rugosimetro) principalmente per i rischi di danneggiamento dello stilo e della superficie da acquisire, o per problemi di accessibilità.

Relativamente ai campioni di marmo sui quali sono stati realizzati dei solchi con lavorazioni laser e waterjet, i cui profili sono stati raffigurati nella figura 4, viene riportata nella figura 6 l'intera superficie ricostruita. Lo scopo di questo studio, oggetto di una trattazione specifica, è quello di valutare in modo oggettivo il livello di contrasto dei solchi ottenuti al fine di ottimizzare il processo di incisione.

Il sistema è stato anche utilizzato per eseguire un'analisi su provini di marmo al fine di individuare una metodologia di parametrizzazione per caratterizzare diversi trattamenti superficiali mediante waterjet. Nella figura 5 è riportata una ricostruzione della superficie di uno dei campioni esaminati. Lo scopo di questa analisi è di individuare parametri geometrici in grado di descrivere oggettivamente diversi effetti superficiali ottenuti al variare dei parametri di lavorazione.

Il sistema ha permesso inoltre di studiare l'usura di utensili rotanti, noti col nome di "perline diamantate", impiegati per

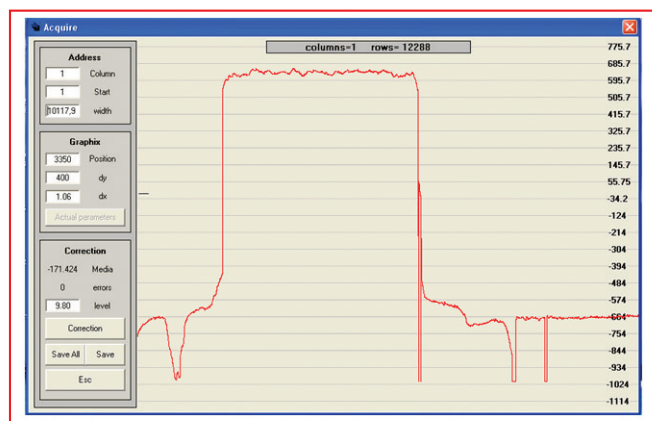


Figura 11 - Profilo di una perlina diamantata utilizzata per l'estrazione di lapidei in cava, come acquisito (sinistra) e dopo correzione automatica (destra)

l'estrazione di blocchi di materiale lapideo in cava. Questi utensili sono costituiti da una matrice metallica di forma cilindrica in cui sono dispersi dei diamanti.

Con il profilometro sono stati acquisiti i profili delle generatrici ad intervalli di lavorazione regolari per valutare lo stato di usura e comprenderne l'evoluzione al fine di progettare utensili e metodi di lavorazione più efficienti (figura 11).

Prestazioni del sistema

PRINCIPALI CARATTERISTICHE	
Risoluzione	2 μm
Ripetibilità	$\pm 1 \mu\text{m}$
Frequenza di campionamento	256 - 1024 acquisizioni/s
Volume di lavoro (superfici)	30 cm^3/ora^*
Volume di lavoro (cilindri)	5 cm^3/ora
Assi controllati	3 (motorizzati) + 1 (manuale)

Tabella 8 - Prestazioni attuali del sistema sviluppato. Dipendono dai componenti commerciali usati. La produttività in acquisizione è limitata dalla tecnologia del sensore

Allo stato attuale, il sistema può essere utilizzato secondo due configurazioni ben definite (con sensore fisso o con sensore mobile) e viene gestito tramite PC mediante un unico programma creato sulla base delle esigenze descritte. Le caratteristiche sono sommariamente riportate nella tabella 8. Grazie alla flessibilità con cui è stato concepito il sistema è aperto a nuovi moduli (possono essere controllati ulteriori 4 assi) e nuove funzioni per aumentare il livello di automazione nel caso di operazioni ripetitive.

Durante la fase di sviluppo, sono state prese a riferimento norme di settore quali la [9], guida per la gestione dei processi di misurazione e per la conferma metrologica delle apparecchiature per misurazione utilizzate per supportare e dimostrare la conformità ai requisiti metrologici.

Per valutare l'applicabilità del sistema, si stimano i seguenti costi di realizzazione espressi in Euro: sensore ottico (4000), sistema di movimentazione (4000), controllo assi (2000), PC con scheda di acquisizione dati (2000), integrazione e sviluppo software (2000), personalizzazione (3000).

Conclusioni

Il sistema descritto consente di eseguire analisi metrologiche che non possono essere effettuate con uno strumento a contatto, mantenendo, tuttavia, un livello di precisione paragonabile, e, allo stesso tempo, ottenendo significativi vantaggi quali la versatilità, in quanto permette di acquisire sia superfici piane che cilindriche, e la modularità, poiché permette l'aggiunta di ulteriori assi, previa personalizzazione del software.

Il principale aspetto critico, in fase di utilizzo, è la ricerca della giusta combinazione dei parametri di misura per

l'applicazione richiesta: velocità relativa tra sensore e provino, frequenza di acquisizione dati e impostazioni di misura del sensore. In particolare è necessario ridurre la velocità di traslazione per problemi di scattering e quindi rumore sul segnale. Ridurre eccessivamente la velocità comporta però problemi di produttività per cui è necessario trovare un compromesso. Nel caso dei materiali lapidei, la velocità ottimale è compresa tra 0,2 e 1 mm/s.

Il valore della frequenza di acquisizione, che dipende anche dalla velocità relativa tra sensore e provino, deve essere scelto in modo da ottenere una adeguata significatività statistica senza eccedere nella mole di dati da immagazzinare e trattare. L'ordine di grandezza può essere determinato in base al diametro del fascio laser emesso dal sensore (tabella 1), in modo da evitare inutili sovrapposizioni tra campioni adiacenti. È stata altresì descritta una tecnica di eliminazione degli errori.

Bibliografia

- [1] R.J. Hocken, N. Chakraborty, C. Brown, "Optical Metrology of Surfaces", *Annals of the CIRP* 54/2/2005, pp. 705-720. 2005.
- [2] H. Schwenke, U. Neuschaefer-Rube, T. Pfeifer, H. Kunzmann, "Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering", *Annals of the CIRP* 51/2/2002, p. 685, 2002.
- [3] D.J. Whitehouse, *Handbook of Surface Metrology*, Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia, ISBN 0-7503-0039-6, 1994.
- [4] N.P. Avdelidis, E.T. Delegou, D.P. Almond, A. Moropoulou, "Surface roughness evaluation of marble by 3D laser profilometry and pulsed thermography", *NDT & E International*, Volume 37, Issue 7, pp. 571-575, October 2004.
- [5] Omron, Smart Sensor ZSL-Series (Ver. 2.0), Z208-E1-01 and User's Manual, <http://www.omron.it>
- [6] Labjack Corp., Labjack U12, *User's Guide*, <http://www.labjack.com>
- [7] Galil Motion Control, ActiveX Tool Kit, OCX, and DMC-21x2/21x3, *User's Manual*, <http://www.galilmc.com>
- [8] Micos, Handbook Pollux Venus-2, *Dinamic Link Library and Position drive Manual*, <http://www.micos.ws>
- [9] UNI EN ISO 10012:2004 *Requisiti per i processi e per le apparecchiature di misurazione*

Ringraziamenti. Questo articolo si basa sul lavoro svolto per il conseguimento della Laurea in Ingegneria Meccanica di Valerio Zambardi, ed è il risultato di un lavoro di "equipe" a cui hanno partecipato i seguenti laureandi: Alessandro Bernardelli e Guido Lenzi (caratterizzazione di superfici in materiale lapideo sottoposte a lavorazione waterjet); Marco Clemente (analisi dell'usura di perline diamantate per l'estrazione di lapidei in cava); Federica Fanti (studio dell'incisione laser e waterjet su materiali lapidei); Camillo Scionti (caratterizzazione di superfici in materiale lapideo lucidate).